第41卷　第8期
2024年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 8
Aug. 2024

1960—2020年黄河流域不同等级降水时空特征

袁　征[1]，张志高[2]，闫　瑾[2]，刘嘉毅[2]，胡柱钰[2]，王　赟[3]，蔡茂堂[4]

（1. 安阳工学院数学与信息科学学院，河南 安阳 455000；2. 安阳师范学院资源环境与旅游学院，河南 安阳 455000；3. 定西市气象局，甘肃 定西 743000；4. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081）

摘　要： 黄河流域是我国重要的生态脆弱区，明确流域不同等级降水量与降水天数、降水强度之间的关系，可为揭示流域降水规律提供基础信息。基于1960—2020年黄河流域96个气象站点降水资料，采用数理统计和Pearson相关分析等方法对流域不同等级降水时空演变特征进行了分析，探讨了不同等级降水对总降水的贡献和影响。结果表明：近61 a黄河流域年降水量和降水强度分别以0.008 mm·$(10a)^{-1}$和0.12 mm·d^{-1}·$(10a)^{-1}$（$P<0.01$）的倾向率增加，降水日数以−1.82 d·$(10a)^{-1}$的倾向率减少（$P<0.01$），小雨和中雨量与日数均呈减少趋势，大雨、暴雨和大暴雨量与日数均呈上升趋势，各等级降水强度均呈增加趋势。近61 a小雨发生率最高为84.32%，小雨贡献率最大，为37.64%；中雨次之，为34.47%；小雨发生率（$P<0.01$）和贡献率呈减少趋势，大雨以上降水发生率和贡献率呈增加趋势。黄河流域小雨量、小雨日数和小雨强度在西南部形成高值中心，随着降水等级的增加，降水量、降水日数和降水强度的高值区域主要集中在流域东南部。相关分析表明，黄河流域年总降水量受中雨和大雨量影响较大，年总降水日数受小雨日数影响较大，年总降水强度受大雨和暴雨量及其降水日数的影响较大。研究结果可为流域生态保护提供参考。

关键词： 降水等级；时空变化；降水强度；气候倾向率；黄河流域

降水作为气候和水文气象中最重要的变量之一，影响着地表径流大小和干湿状况，对全球水循环起着不可或缺的作用[1-2]。20世纪以来，全球气候显著变暖，联合国气候变化专门委员会（IPCC）在仁川发布的《全球变暖1.5 ℃的特别报告》指出自1860年以来，人为造成的全球变暖已经达到0.87 ℃[3]。以增温为主要特征的全球气候变化正显著影响全球水文循环，致使降水结构和格局出现明显变化，如降水时空分布的非均匀性加剧，干旱、台风和极端降水事件频发[4-6]。不同等级降水存在不同的变化趋势，进而深刻影响区域社会经济发展和生态环境[7-11]。近年来，国内外学者针对欧洲[12]、美国[13]和中国不同地区[14-18]和不同流域[19-21]不同等级降水时空格局开展了一系列的研究工作。然而降水变化具有明显的区域性，探究不同区域不同等级降水时空演变规律，明确降水量与降水日数、降水强度之间的关系，对区域旱涝灾害防治及生态环境保护等具有重要意义。

黄河是我国第二大河，全长5464 km，流域面积约$79.5×10^4$ km^2，跨越干旱、半干旱和半湿润区，属于典型的复杂气候区。流域内降水主要集中于7—8月，降水分布不均匀。随着全球气候变暖，黄河流域极端气候事件频发，严重威胁流域脆弱的生态环境[22-23]。在已有的黄河流域降水研究中，不同学者对黄河流域降水时空演变特征[24]、汛期降水[25]、极端降水[26-27]、干湿变化[28]、大气环流对上游地区降水的影响[29-30]以及降水对区域生态的影响[31-32]等方面分别进行了研究，然而对于黄河流域不同等级降水量、降水日数和降水强度方面的研究还较少。因此，本文利用1960—2020年黄河流域96个气象站点降水资料，采用数理统计和Pearson相关分析等方法对黄河流域不同等级降水量、降水日数及降水强

收稿日期： 2024-01-08；　**修订日期：** 2024-04-15
基金项目： 国家自然科学基金项目（42272112）；河南省科技攻关项目（232102320024，232102321109）；河南省哲学社会科学规划项目（2022BJJ003）；河南省高等学校重点科研项目（23A170008）；安阳市科技发展计划项目（2022C01NY019）
作者简介： 袁征(1988-)，女，讲师，主要从事气候变化与气候统计研究. E-mail: yz_12250804@163.com
通讯作者： 蔡茂堂. E-mail: Caimaotang@126.com

度时空分异特征进行研究，探讨各等级降水对流域总降水的贡献和影响，以期为黄河流域水资源可持续利用以及维护地区生态安全等提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°6′~41°48′N，95°50′~119°6′E)横贯青藏高原、内蒙古高原和黄土高原和下游冲积平原3级阶梯，包含青海、四川等9省区，流域面积约 7.52×10^5 km^2。黄河流域海拔在0~6241 m，西接青藏高原，中部为黄土高原区，东邻华北平原，东西跨度约5464 km，整体地势西高东低，起伏显著。黄河流域受大气环流和季风环流的影响，跨越干旱、半干旱、半湿润气候区。流域多数地区降水在200~650 mm，年均温在−4~14 ℃，全年日照时数在2000~3300 h。

1.2 数据来源

黄河流域96个国家地面气象观测站1960—2020年逐日降水气象资料来自中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)中国地面气候资料日值数据集。该数据集经过了极值检验和RHtest均一性检验等方面的严格质量控制。针对部分站点一些年份数据缺测或者数据无效等情况，将邻近站点相关数据采用线性插补的方法，尽可能降低数据误差。96个站点较均匀分布于黄河流域，能代表黄河流域降水的一般情况。为了研究黄河流域不同等级降水变化的区域特征，将黄河流域进一步划分为上、中、下游3个地区，其中上游地区包括玛曲、玛多和乌鞘岭等41个站点，中游包括榆林、孟津和三门峡等47个气象站点，下游地区包括新乡、开封和济南等8个气象站点。研究区域及气象站点分布如图1所示。

1.3 研究方法

根据国家标准《降水量等级(GB/T28592−2012)》[33]将黄河流域降水等级按照24 h降水量大小的不同依次划分为：小雨(0~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)和大暴雨(≥100 mm)5个等级。降水强度=某降水时段内降水量/同时间内降水日数。采用降水发生率和贡献率探讨各等级降水对年总降水的影响，降水发生率=某一等级降水日数/年总降水日数，降水贡献率=某一等级降水量/年总降水量。采用线性回归法对黄河流域不同等级降水变化趋势进行分析，采用 F 检验方法对线性趋势进行显著性检验，利用Pearson相关分析法分析不同等级降水与年总降水的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同等级降水时间变化特征

2.1.1 不同等级降水量时间变化 由图2可知，1960—2020年黄河流域多年平均降水量为498.53 mm

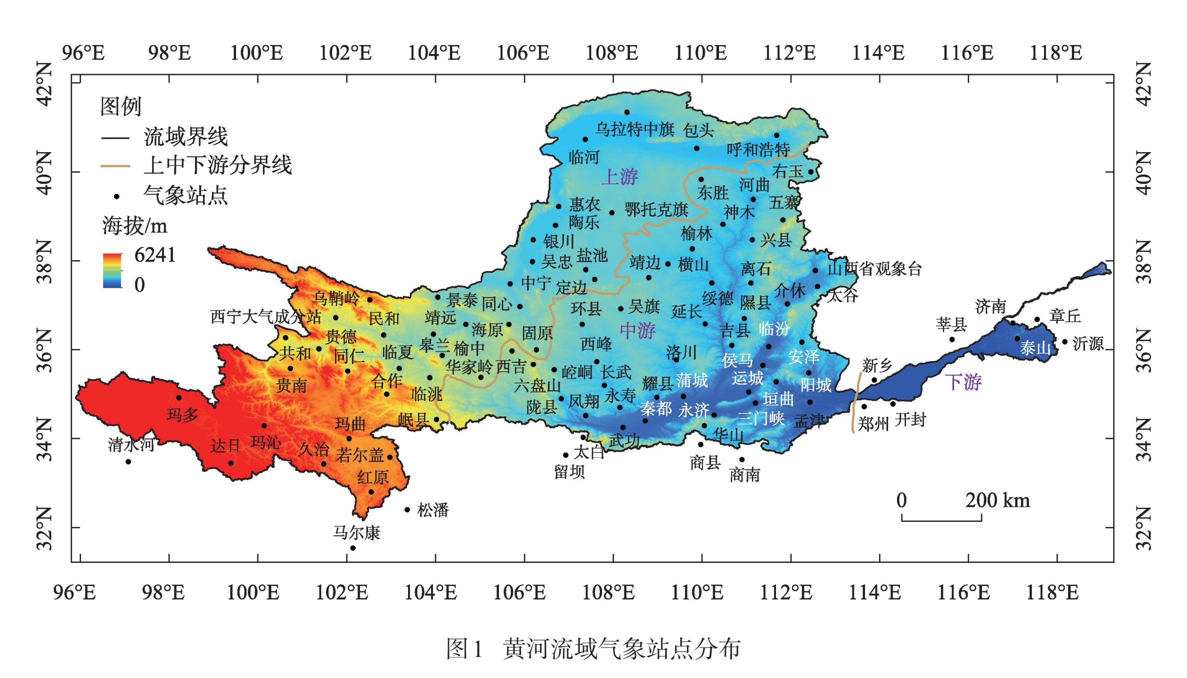


图1 黄河流域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Yellow River Basin

(图2f),最低为1997年的364.99 mm,最高为1964年的710.20 mm,相差345.21 mm;小雨量多年平均为186.55 mm,最低为1997年的151.29 mm,最高为1964年的241.69 mm,二者相差90.40 mm;近61 a中雨量在117.18~235.30 mm之间,多年平均为171.99 mm,1997年最低,1964年最高,高低值相差118.12 mm;大雨量多年平均为94.59 mm(图2c),最低为1965年的56.31 mm,最高为1964年的146.24 mm,相差89.93 mm;暴雨量多年平均为37.21 mm(图2d),最低为1965年的17.46 mm,最高为1964年的69.46 mm,相差52 mm;大暴雨量多年平均为8.20 mm(图2e),在1.05~21.33 mm之间,1986年最低,1972年最高,相差20.28 mm。近61 a黄河流域各等级降水多年均值表现为:小雨(186.55 mm)>中雨(171.99 mm)>大雨(94.59 mm)>暴雨(37.21 mm)>大暴雨(8.20 mm)。小雨、中雨、大雨、暴雨和年总降水量的最大值发生在1964年,小雨、中雨和年总降水量的最小值发生于1997年,而大雨和暴雨量的最小值发生在1965年。

从变化趋势来看,近61 a来黄河流域年总降水以0.008 mm·$(10a)^{-1}$的倾向率呈微弱上升趋势,分等级来看,小雨、中雨量逐渐下降,倾向率分别为−1.51 mm·$(10a)^{-1}$和−0.17 mm·$(10a)^{-1}$,而大雨量、暴雨量和大暴雨呈波动上升趋势,倾向率分别为1.10 mm·$(10a)^{-1}$、0.49 mm·$(10a)^{-1}$和0.10 mm·$(10a)^{-1}$。小雨和中雨多年均值相对其他等级来说较高,但61 a来大雨以上量级对黄河流域年总降水量的增加起重要作用。

2.1.2　不同等级降水日数时间变化　由图3可知,近61 a黄河流域年总降水日数均值为93.78 d(图3f),最小为1997年的76.05 d,最高为1964年的132.19 d;小雨日数均值为79.06 d(图3a),最小为2013年的

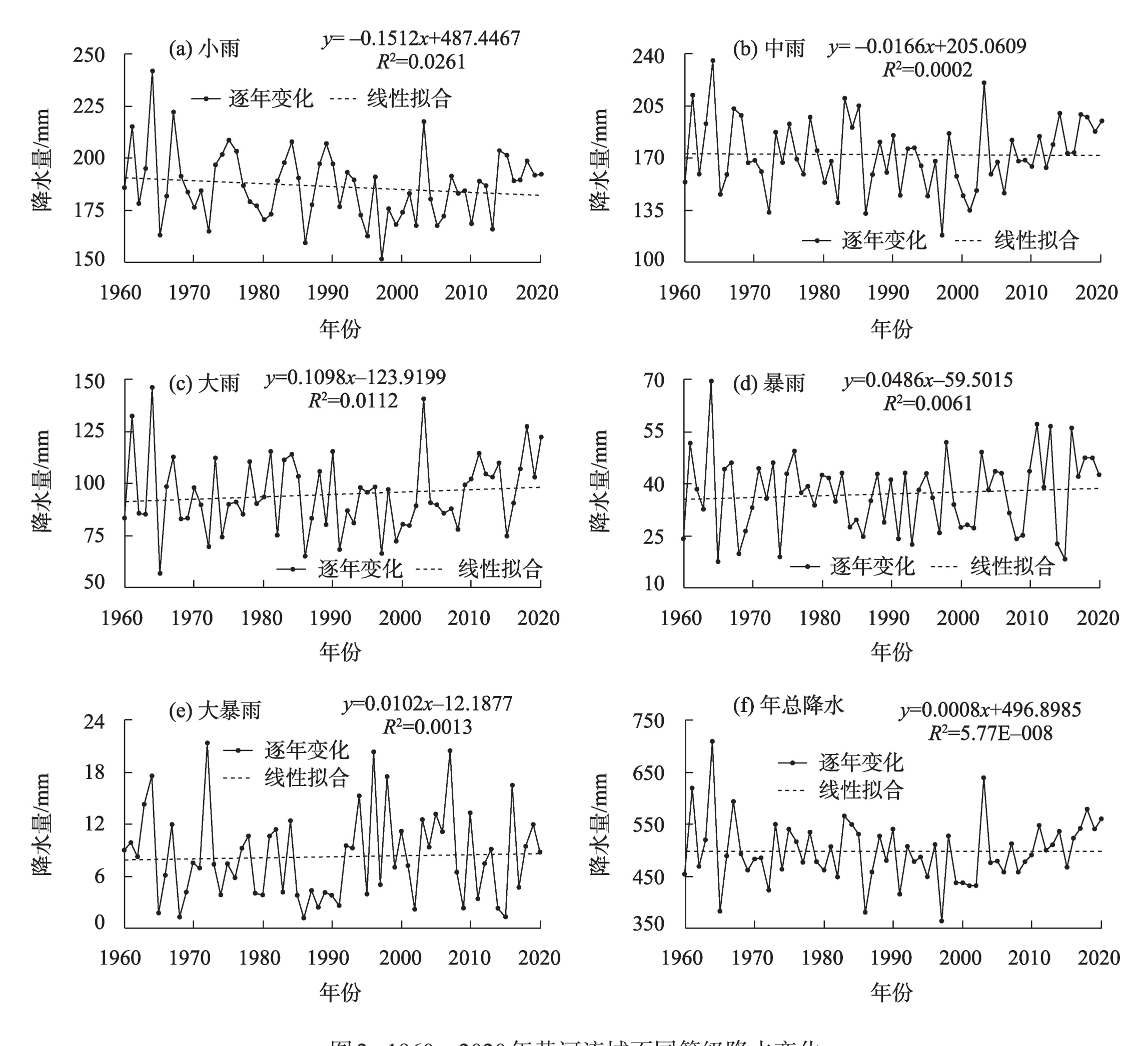


图2　1960—2020年黄河流域不同等级降水变化

Fig. 2　Variation of different grade precipitation in Yellow River Basin from 1960 to 2020

64.42 d，最高为1964年的111.22 d；中雨日数在7.83~15.35 d之间（图3b），平均为11.24 d，1997年最小，1964年最高；大雨日数均值为2.83 d（图3c），最小为1965年的1.72 d，最高为1964年的4.38 d；暴雨日数均值为0.58 d（图3d），最小为1965年的0.28 d，最高为1964年的1.10 d；大暴雨日数均值为0.06 d（图3e），最小为2015年的0.01 d，最高为1972年的0.17 d。近61 a黄河流域各等级降水日数多年均值表现为：小雨（79.06 d）>中雨（11.24 d）>大雨（2.83 d）>暴雨（0.58 d）>大暴雨（0.06 d）。小雨、中雨、大雨、暴雨和年总降水量的最大值发生在1964年，中雨和年总降水量的最小值发生于1997年，而大雨和暴雨量的最小值发生在1965年。

线性拟合可知，黄河流域小雨、中雨和年总降水日数分别以−1.83 d·$(10a)^{-1}$（$P<0.01$）、−0.03 d·$(10a)^{-1}$和−1.82 d·$(10a)^{-1}$（$P<0.01$）的倾向率呈波动下降趋势，而大雨、暴雨和大暴雨日数呈波动上升趋势，倾向率分别为0.03 d·$(10a)^{-1}$、0.007 d·$(10a)^{-1}$和0.0001 d·$(10a)^{-1}$，因此，小雨对黄河流域年总降水日数的减少起重要作用。

2.1.3 不同等级降水强度时间变化 由图4可知，近61 a黄河流域年总降水强度在4.21~6.50 mm·d^{-1}之间（图4f），均值为5.39 mm·d^{-1}，其中1965年最低，2013年最大；小雨强度均值为2.35 mm·d^{-1}，最高为2003年的2.56 mm·d^{-1}，最低为1965年的2.05 mm·d^{-1}；中雨强度最高为1961年的15.71 mm·d^{-1}，最低为1982年的14.46 mm·d^{-1}，均值为15.15 mm·d^{-1}；大雨强度最高值为2018年的32.46 mm·d^{-1}，最低为1965年的19.29 mm·d^{-1}，均值为27.71 mm·d^{-1}；暴雨强度最高为1964年的36.31 mm·d^{-1}，最低为1965年的12.86 mm·d^{-1}，均值为22.96 mm·d^{-1}；大暴雨强度最高为1996年的17.48 mm·d^{-1}，最低值为1986年的

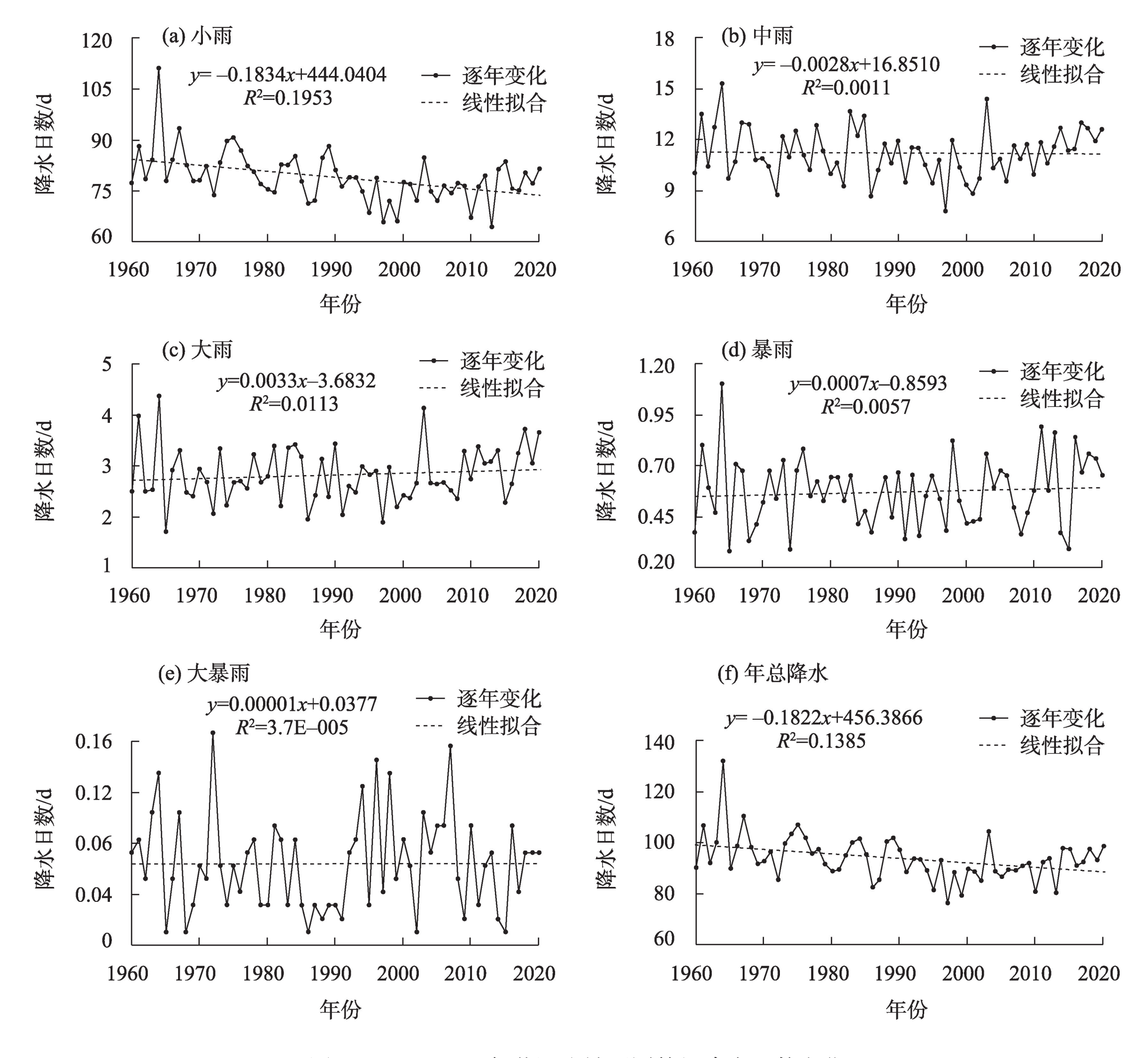


图3 1960—2020年黄河流域不同等级降水日数变化

Fig. 3 Variation of different grade precipitation days in Yellow River Basin from 1960 to 2020

1.05 mm·d^{-1}，均值为6.98 mm·d^{-1}。近61 a黄河流域各等级降水强度多年均值表现为大雨(27.71 mm·d^{-1})>暴雨(22.96 mm·d^{-1})>中雨(15.15 mm·d^{-1})>大暴雨(6.98 mm·d^{-1})>小雨(2.35 mm·d^{-1})。小雨、大雨、暴雨和年总降水强度最小值均出现在1965年。

1960—2020年黄河流域年总降水日数减少，总降水量增加，因此，年总降水强度以0.12 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)的倾向率呈波动上升趋势，各等级降水强度均呈波动上升趋势，倾向率分别为0.03($P<0.01$)、0.03、0.24、0.008 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$和0.10 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$。

2.1.4　上中下游不同等级降水变化　由表1可知，近61 a来流域上、中、下游地区均是以小雨日数最多，上游地区小雨量最大，大雨强度最大，中游地区中雨量最大，大雨强度最大，下游地区中雨量最大，暴雨强度最大。从变化趋势来看，上游地区小雨日数呈减小趋势，倾向率为−1.11 d·(10a)$^{-1}$($P<0.05$)，中游和下游地区的小雨日数均呈显著减小趋势($P<0.01$)，上、中、下游地区小雨强度均呈显著增加趋势($P<0.01$)，中游和下游地区的小雨量均呈显著减小趋势($P<0.01$)，其他等级降水变化未通过$\alpha=0.05$的显著性检验。

2.1.5　不同等级降水贡献率和发生率变化特征　由图5a可知，小雨的贡献率最大为37.64%，中雨(34.47%)、大雨(18.85%)和暴雨(7.40%)次之，大暴雨则最小为1.63%(图5a)。在变化趋势上，小雨和中雨贡献率分别以−0.32%·(10a)$^{-1}$和−0.05%·(10a)$^{-1}$的倾向率呈波动下降趋势，小雨下降趋势更为明显，由20世纪60年代的38.05%降至21世纪10年代的35.84%。大雨、暴雨和大暴雨的贡献率分别以0.23%·(10a)$^{-1}$、0.11%·(10a)$^{-1}$和0.02%·(10a)$^{-1}$的倾向率呈波动上升趋势，其中大雨的贡献率增幅最大，由20世纪60年代的18.31%增至21世纪10年代的19.86%。

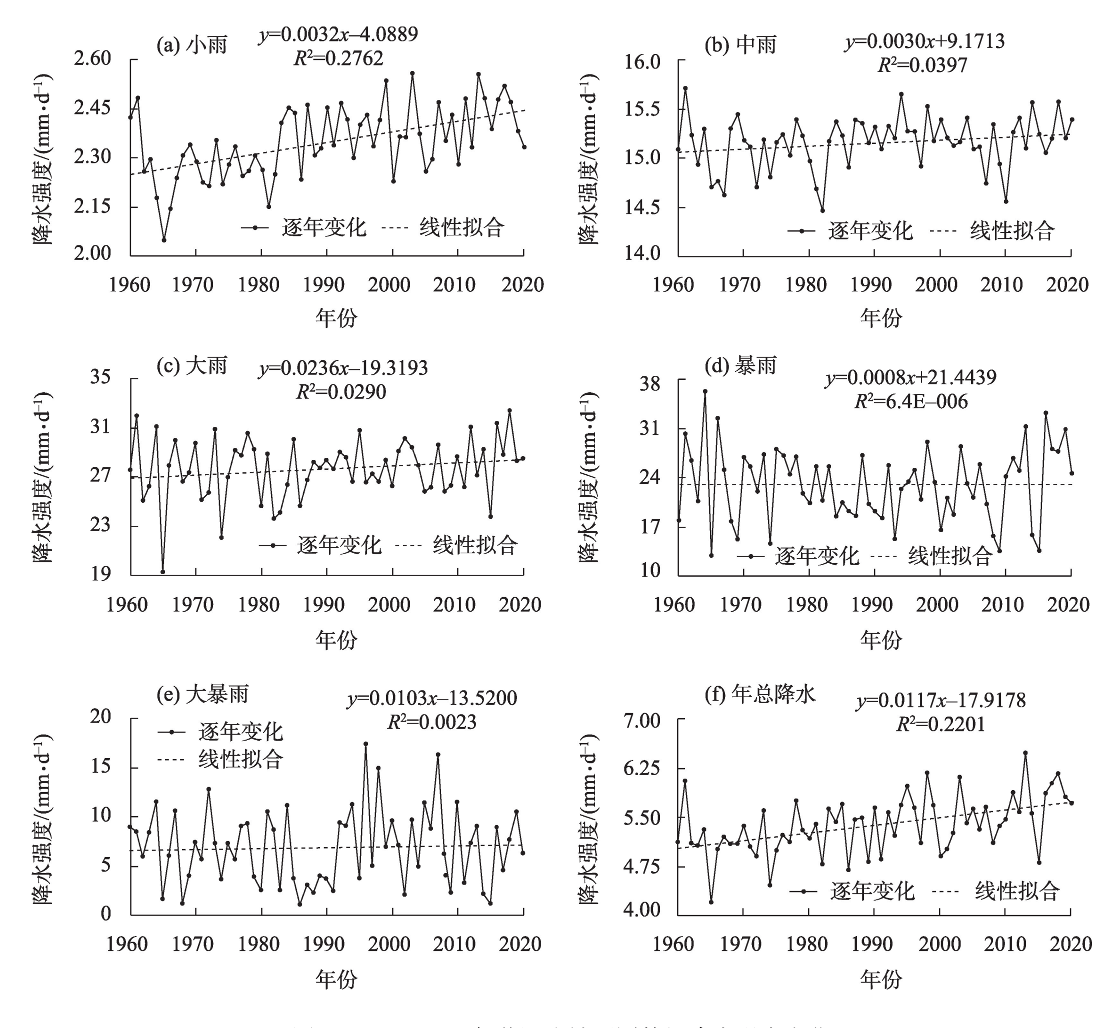


图4　1960—2020年黄河流域不同等级降水强度变化

Fig. 4　Variation of different grade precipitation intensity in Yellow River Basin from 1960 to 2020

表1 1960—2020年黄河流域上中下游地区不同等级降水变化

Tab. 1 Variation of different grade precipitation in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin from 1960 to 2020

地区		上游			中游			下游		
		降水量/mm	降水日数/d	降水强度/(mm·d^{-1})	降水量	降水日数	降水强度/(mm·d^{-1})	降水量	降水日数	降水强度/(mm·d^{-1})
小雨	均值	201.56	87.37	2.26	179.69	74.79	2.41	149.92	61.6	2.43
	倾向率	0.85	−1.11*	0.04**	−3.45*	−2.28**	0.03**	−2.22*	−2.69**	0.04**
中雨	均值	147.04	9.93	14.66	192.72	12.38	15.5	178.06	11.23	15.69
	倾向率	2.41	0.15	0.06	−2.27	−0.18	0.03	−1.02	−0.06	−0.1
大雨	均值	45.27	1.42	21.57	123.62	3.63	32.03	176.84	5.14	33.84
	倾向率	1.26	0.03	0.44	1.22	0.04	0.13	−0.42	−0.02	−0.2
暴雨	均值	9.12	0.15	7.59	46.01	0.72	30.94	129.38	1.94	54.83
	倾向率	−0.49	−0.01	−0.17	1.56	0.02	0.36	−1.02	−0.01	−1.16
大暴雨	均值	1.21	0.01	0.93	7	0.06	6.69	51.15	0.38	39.67
	倾向率	−0.36	−0.002	−0.2	0.22	0.001	0.13	1.77	0.01	1.48

注：**表示显著水平α=0.01；*表示显著水平α=0.05。

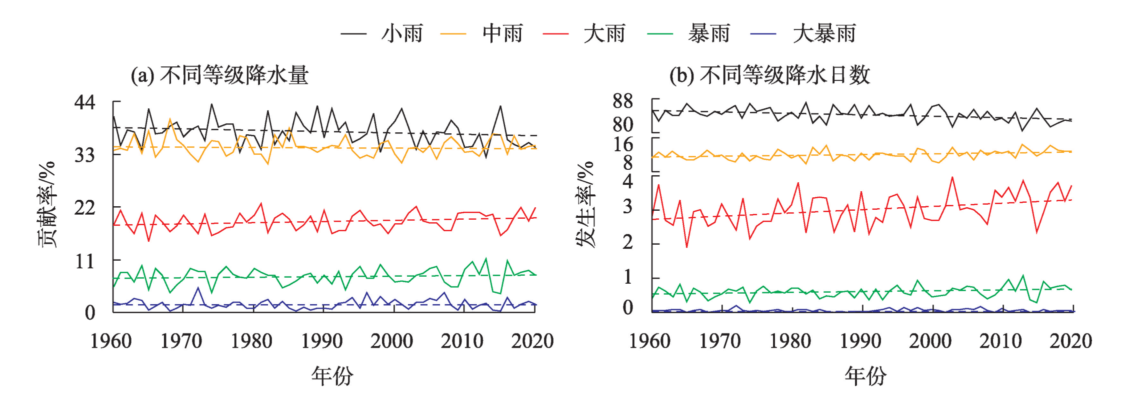


图5 不同等级降水对年总降水的影响

Fig. 5 Influence of different grade precipitation on annual total precipitation

从降水发生率来看，小雨(84.32%)>中雨(11.98%)>大雨(3.02%)>暴雨(0.61%)>大暴雨(0.07%)，小雨日数发生率最大，远超其他等级降水。在变化趋势上，近61 a来小雨发生率以−0.33%·(10a)$^{-1}$(P<0.01)的趋势呈下降趋势，由20世纪60年代的84.75%降至21世纪10年代的82.98%。中雨、大雨、暴雨和大暴雨的发生率则呈波动上升趋势，倾向率分别为：0.21%·(10a)$^{-1}$(P<0.01)、0.10%·(10a)$^{-1}$(P<0.01)、0.02%·(10a)$^{-1}$和0.002%·(10a)$^{-1}$。

2.1.6 上中下游地区不同等级降水贡献率和发生率变化 由表2可知，上游地区小雨的贡献率最大为49.53%，中雨为35.61%、大雨为11.77%，暴雨为2.77%，大暴雨最小，为0.32%。小雨和中雨贡献率由上游到下游呈现下降趋势，小雨下降趋势更为明显，从上游的49.53%降到下游的24.32%，下降了25.21%。大雨、暴雨和大暴雨的贡献率从上游到下游逐渐增大，其中暴雨的贡献率增幅最大，由上游的2.77%增至下游的16.85%，增长了14.08%。

从降水发生率来看，上游地区小雨(88.31%)>中雨(9.91%)>大雨(1.57%)>暴雨(0.20%)>大暴雨(0.01%)，中游地区小雨(81.65%)>中雨(13.52%)>大雨(3.99%)>暴雨(0.78%)>大暴雨(0.06%)，下游地区小雨(77.72%)>中雨(13.76%)>大雨(5.96%)>暴雨(2.15%)>大暴雨(0.41%)。从上游到下游地区，小雨发生率逐渐下降，中雨、大雨、暴雨和大暴雨的发生率逐渐增加。

2.2 不同等级降水空间分布特征

2.2.1 不同等级降水量空间分布 1960—2020年黄河流域不同等级降水量均值空间分布如图6所示，流域年降水总量总体呈东南到西北递减趋势，东南

表2　1960—2020年黄河流域上中下游不同等级降水贡献率和发生率变化

Tab. 2　Changes in contribution rates and occurrence rates of different grade precipitation in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin from 1960 to 2020

地区	上游		中游		下游	
	贡献率/%	发生率/%	贡献率/%	发生率/%	贡献率/%	发生率/%
小雨	49.53	88.31	33.18	81.65	24.32	77.72
中雨	35.61	9.91	35.29	13.52	27.43	13.76
大雨	11.77	1.57	22.16	3.99	25.07	5.96
暴雨	2.77	0.2	8.18	0.78	16.85	2.15
大暴雨	0.32	0.01	1.2	0.06	6.33	0.41

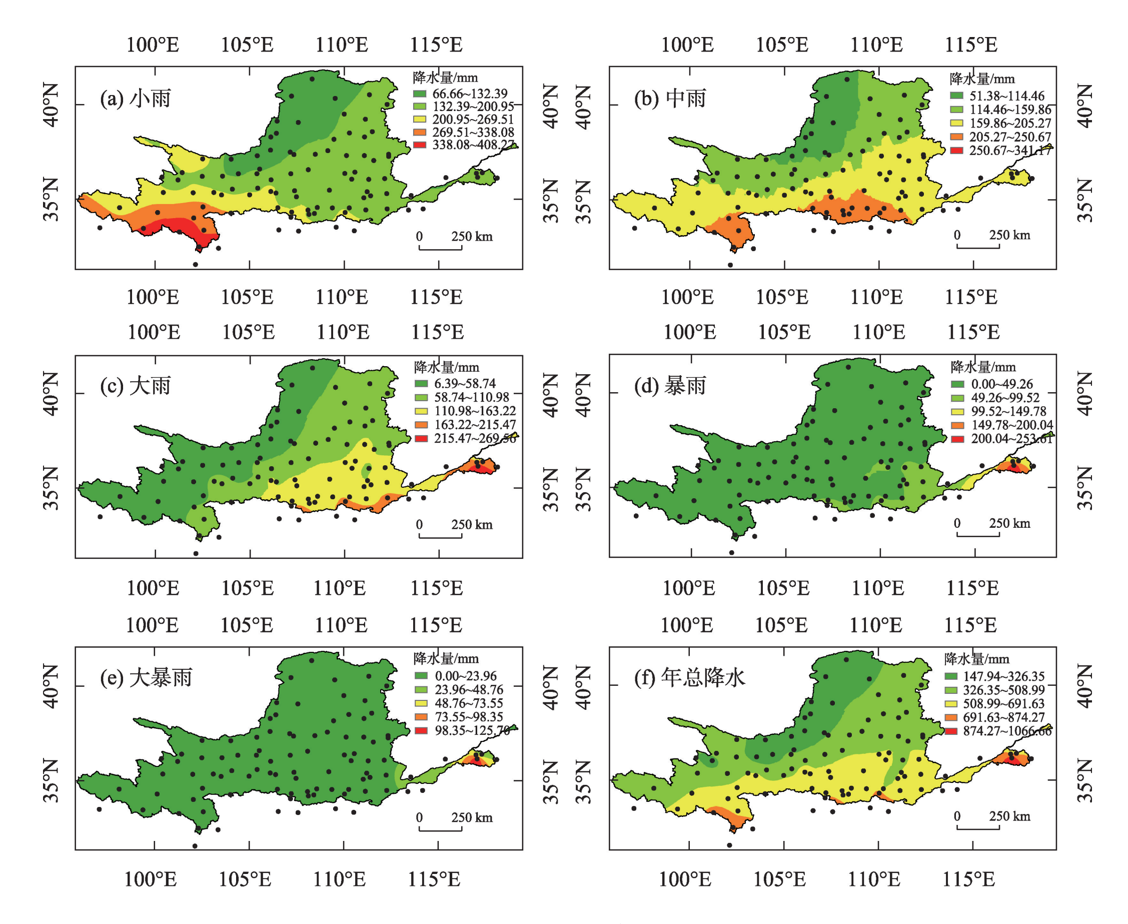


图6　黄河流域不同等级降水量空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of different grade precipitation in Yellow River Basin

部留坝—佛坪—泰山雨量最多,在853.62 mm以上,西北部临河—惠农—陶乐最少,在179.42 mm以下。小雨量整体空间分布呈由南到北逐渐减少、由东南到西北逐渐减少的趋势(图6a),流域西南部清水河—达日—久治—红原小雨量最多,在354.19 mm以上,西北部临河—惠农—陶乐最少,在83.20 mm以下。中雨量整体空间分布呈由南到北逐渐减少、由东南到西北逐渐减少的趋势(图6b),流域南部红原—久治及留坝—商南中雨量>260.40 mm,西北部临河—惠农—景泰—陶乐最少,在64.84 mm以下。大雨量整体呈由东南到西北逐渐减少的趋势(图6c),流域东南部华山、商南、佛坪和泰山等地大雨量超过207.70 mm,西部清水河—玛多—贵德最少,在18.02 mm以下。暴雨量整体呈由东南到西北逐渐减少的趋势(图6d),流域东南部泰山暴雨量达253.61 mm,西部松潘、乌鞘岭、玛沁、达日、皋兰和共和等6站暴雨量为0。流域大暴雨量整体呈由东到西逐渐减少的趋势(图6e),流域东南部泰山大暴雨量达125.70 mm,西北部达日、乌鞘岭、同心和包头等39站大暴雨量为0。

2.2.2　不同等级降水日数空间分布　1960—2020年黄河流域不同等级降水日数均值空间分布如图7所示，近61 a来流域年总降水日数总体呈由南到北、由西南到东北递减趋势，年总降水日数高值中心在西南部清水河—久治—红原，在172.57 d以上，低值区在西北部临河—惠农—陶乐，在45.31 d以下。小雨日数空间分布与年总降水日数相似，高值中心在西南部清水河—达日—久治—红原，在150.21 d以上，低值区在西北部临河—惠农—陶乐，在40.21 d以下。中雨日数在流域南部红原—久治形成高值中心，在19.98 d以上，西北部临河—惠农—陶乐最低，在4.28 d以下。大雨日数与大雨量空间分布相似，流域东南部华山、商南、佛坪和泰山等地大雨日数超过6.18 d，西部清水河—玛多—贵德最少，在0.59 d以下。暴雨日数高值中心在东南部沂源、济南和泰山等地，暴雨日数超过1.85 d，西部共和、皋兰、达日、玛沁、乌鞘岭和松潘等6站暴雨日数为0。流域东南部沂源、济南和泰山等地为大暴雨日数高值中心，大暴雨日数超过0.34 d，西北部达日、乌鞘岭、同心和包头等39站大暴雨日数为0。

2.2.3　不同等级降水强度空间分布　由图8可知，近61 a来黄河流域降水强度总体呈东南到西北递减趋势，年总降水强度在2.48~10.51 mm·d^{-1}之间，东南部沂源、济南和泰山等地为高值中心，年总降水强度在8.66 mm·d^{-1}以上，西部玛多和清水河为低值中心，年总降水强度在3.02 mm·d^{-1}以下。小雨强度在1.85~2.76 mm·d^{-1}之间，西部玛多—乌鞘岭—景泰—临河最少，在2.01 mm·d^{-1}以下，久治和松潘站最高，在2.65 mm·d^{-1}以上。中雨强度在13.32~16.11 mm·d^{-1}之间，西北部清水河—惠农—玛多最少，在14.01 mm·d^{-1}以下，东南部济南和松潘站最高，在16.02 mm·d^{-1}以上。大雨强度在5.38~34.92 mm·d^{-1}之间，西部玛多最少，东南部莘县最高。暴雨强度在0~66.26 mm·d^{-1}之间，东南部沂源、济南和泰山等地为高值中心，暴雨强度超过56.80 mm·d^{-1}，西部松潘、乌鞘岭、玛沁、达日、皋兰和共和等6站为0。大暴雨强度在0~76.65 mm·d^{-1}之间，东南部沂源、济南和泰山等地为高值中心，大暴雨强度超过40.71 mm·d^{-1}，

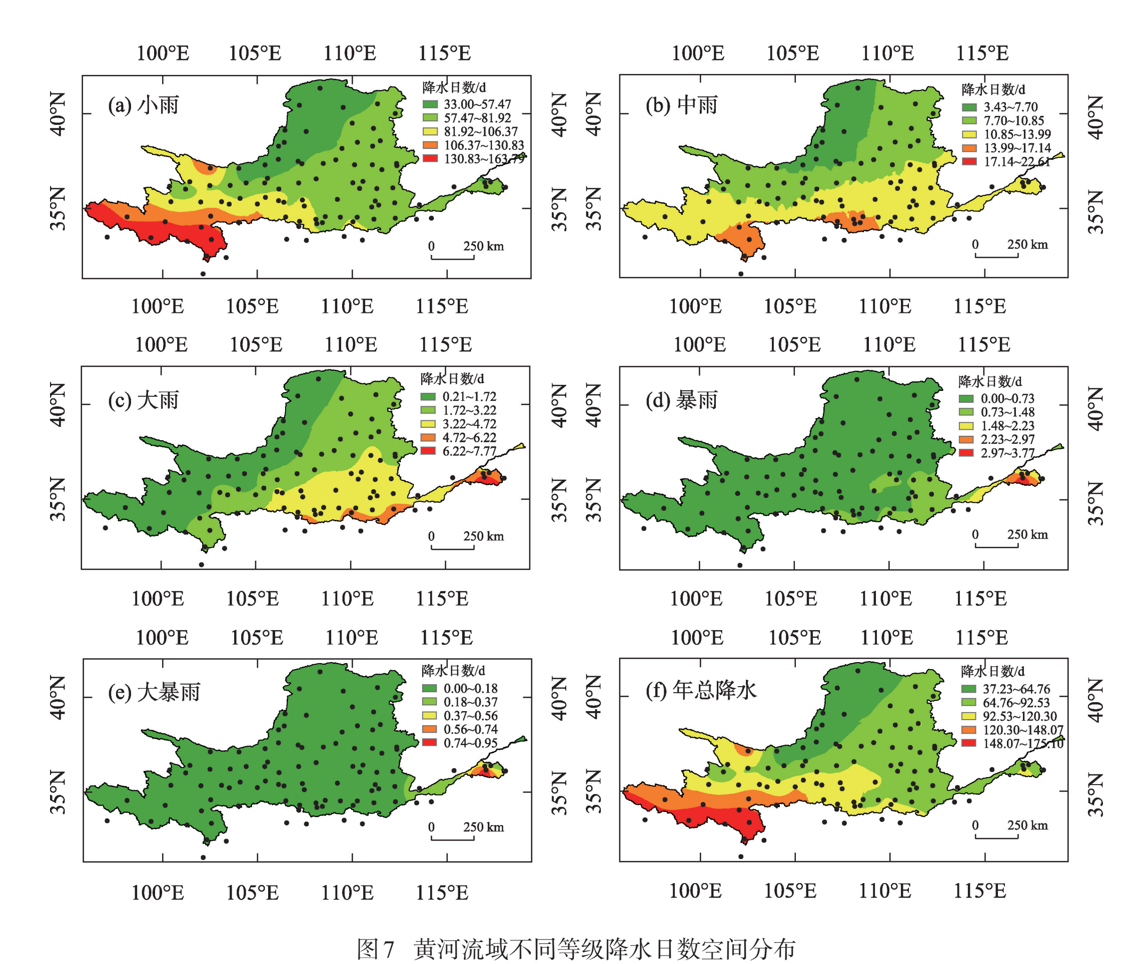


图7　黄河流域不同等级降水日数空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of different grade precipitation days in Yellow River Basin

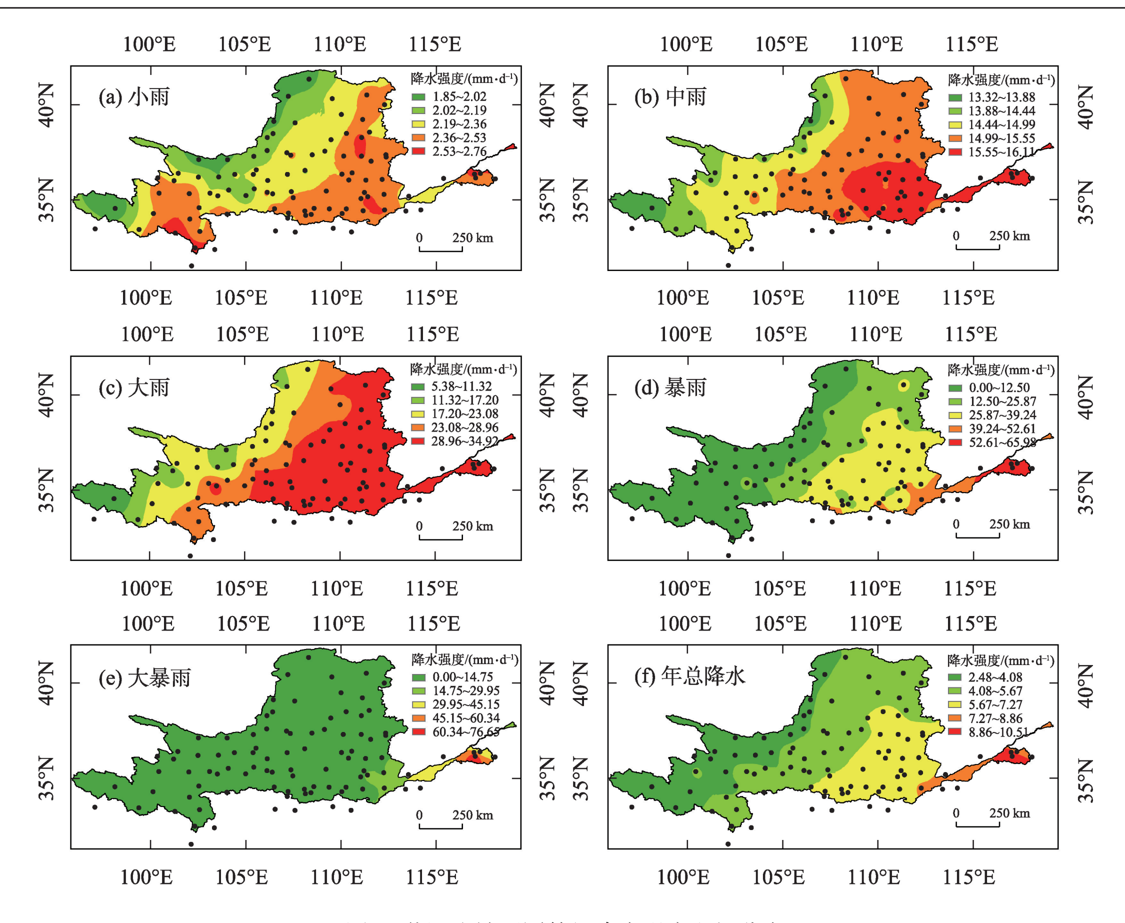


图8　黄河流域不同等级降水强度空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of different grade precipitation intensity in Yellow River Basin

西北部达日、乌鞘岭、同心和包头等39站大暴雨强度为0。

2.3　不同等级降水对年总降水的影响

近61 a来黄河流域不同等级降水与年总降水的Pearson相关分析结果如表3所示，由表3可知，流域年总降水量与不同等级降水量相关关系均通过了95%的置信检验，表现为：中雨(0.924)>大雨(0.906)>小雨(0.806)>暴雨(0.665)>大暴雨(0.319)，说明黄河流域中雨和大雨对年总降水量影响较大。年总降水日数与各等级降水日数的相关系数均为正值，但相关系数随降水等级增加而递减，其中与小雨日数相关系数达0.981(P<0.01)，说明黄河流域年总降水日数主要受小雨日数的影响。黄河流域年总降水强度与小雨降雨日数呈不显著负相关，与中雨、大雨、暴雨和大暴雨量和降水日数均呈显著正相关，表现为：大雨>暴雨>中雨>大暴雨，表明黄河流域总降水强度受大雨和暴雨量及其降水日数的影响较大。

表3　黄河流域不同等级降水与年总降水的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficients between different grade precipitation and annual total precipitation in Yellow River Basin

降水指标		年总降水量	年总降水日数	年总降水强度
降水量	小雨	0.806**	–	0.096
	中雨	0.924**	–	0.512**
	大雨	0.906**	–	0.673**
	暴雨	0.665**	–	0.628**
	大暴雨	0.319*	–	0.285*
降水日数	小雨	–	0.981**	–0.236
	中雨	–	0.730**	0.480**
	大雨	–	0.575**	0.667**
	暴雨	–	0.342**	0.638**
	大暴雨	–	0.130	0.286*

注：**表示相关性在0.01水平上显著相关；*表示相关性在0.05水平上显著相关。

3　讨 论

1960—2020年黄河流域小雨和中雨量与日数呈减少趋势，大雨、暴雨和大暴雨量与日数均呈上

升趋势，降水强度呈增加趋势（$P<0.01$），这与前人研究结果一致。Gao等[26]研究发现，黄河流域降雨强度增加。严中伟等[34]发现，我国微量降水事件显著减少，是北方干旱化的诱因，反映了大气环境的干旱化。汪卫平等[35]对我国降雨日数进行分析后发现，季风区小雨日数呈显著减少趋势；Qian等[36]发现我国小雨和中雨发生频率显著减少，而暴雨增加。小雨日数的减少可能与人类活动及大气环流的振荡有关[37]，部分学者认为全球变暖和人类活动引起的气溶胶增加是小雨日数减少的主要原因[38-39]。增暖导致水汽更难凝结，同时使小雨向大雨偏移，降雨强度增大[40]。气溶胶则增加空气稳定性，影响云团的形成[41]。近61 a来黄河流域降水以小雨为主，小雨发生率和贡献率分别为84.32%和37.64%，小雨发生率和贡献率呈减小趋势，大雨、暴雨和大暴雨发生率和贡献率则呈上升趋势，这与我国近几十年小雨和中雨发生频率显著减少，小雨量占年降雨量比例逐渐下降[42]，暴雨则呈增加趋势的研究结论一致[36]。Liu等[43]发现，我国小雨频次减少，强降水事件频率增加。近61 a来黄河流域小雨、中雨和年总降水日数减少，对应着流域无降雨日数的增加，这将加剧流域的干旱程度，而黄河流域大雨、暴雨和大暴雨增加，各等级降水强度增强，表明流域降水向强降水转移的态势，更易造成流域洪涝灾害的发生。

本文分析探讨了近61 a来黄河流域不同等级降水的时空变化特征及其对年总降水的影响，地形、大气环流以及经济发展和城市化进程等对流域不同等级降水的影响还有待进一步研究。

4 结 论

（1）1960—2020年黄河流域年降水量、降水日数和降水强度均值分别为498.53 mm、93.78 d和5.39 mm·d^{-1}，并分别以0.008 mm·(10a)$^{-1}$、−1.82 d·(10a)$^{-1}$（$P<0.01$）和0.12 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$（$P<0.01$）的倾向率变化。近61 a来流域小雨和中雨量与日数均呈减少趋势，大雨、暴雨和大暴雨量与日数均呈上升趋势，各等级降水强度均呈增加趋势。分区域来看，上中下游地区小雨强度均呈显著增加趋势（$P<0.01$），中游和下游地区的小雨日数和小雨量均呈显著减小趋势（$P<0.01$），上游地区小雨日数以−1.11 d·(10a)$^{-1}$的倾向率呈减小趋势（$P<0.05$），其他等级降水变化未通过$\alpha=0.05$的显著性检验。

（2）近61 a黄河流域各等级降水对年总降水的贡献依次为：小雨（37.64%）>中雨（34.47%）>大雨（18.85%）>暴雨（7.40%）>大暴雨（1.63%）。小雨贡献率下降明显，由20世纪60年代的38.05%降低到21世纪10年代的35.84%，大雨的贡献率增幅最大，由18.31%增至19.86%。小雨发生率达84.32%，大暴雨仅为0.07%，近61 a来小雨发生率以−0.33%·(10a)$^{-1}$的倾向率下降（$P<0.01$），由20世纪60年代的84.75%降至21世纪10年代的82.98%，但仍起主导作用，其他等级降水发生率则波动上升。从上游到下游地区，小雨和中雨的贡献率逐渐下降，大雨及以上量级降雨贡献率逐渐上升，小雨发生率逐渐下降，中雨、大雨、暴雨和大暴雨的发生率逐渐增加。

（3）空间分布上，黄河流域年降水量和年降水强度总体由东南向西北呈减小趋势，年降水日数整体由南向北减小，由西南向东北减少。黄河流域小雨量、小雨日数和小雨强度在西南部形成高值中心，随着降水等级的增加，降水量、降水日数和降水强度的高值区域主要集中在流域东南部。

（4）相关分析表明，1960—2020年黄河流域年总降水量受中雨和大雨量影响较大，年总降水日数主要受小雨日数影响，年总降水强度主要受大雨和暴雨量及其降水日数的影响。

参考文献（References）：

[1] Xu J H, Chen Y N, Li W H, et al. Understanding temporal and spatial complexity of precipitation distribution in Xinjiang, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1): 321-333.

[2] Pokhrel Y, Felfelani F, Satoh Y, et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(3): 226-233.

[3] IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5 ℃[M]. UK: Cambridge University Press, 2018.

[4] 尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇. 基于情景的1951—2011年中国极端降水风险评估[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 405-413. [Yin Zhan'e, Tian Pengfei, Chi Xiaoxiao. Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951-2011) [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 405-413.]

[5] Liu J, Wang B, Cane M, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing[J]. Nature, 2013, 493(7434): 656-659.

[6] Murray V, Ebi K L. IPCC Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adapta-

tion (SREX)[J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012, 66(9): 759-760.

[7] Zhang Q, Xu C Y, Chen X, et al. Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960-2005[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(11): 1665-1678.

[8] 起永东, 何明琼, 郑永宏, 等. 汉江流域降水结构时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 192-200. [Qi Yongdong, He Mingqiong, Zheng Yonghong, et al. Analyses of rainfall characteristics and influencing factors in Hanjiang River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 192-200.]

[9] 刘占明, 徐丹, 魏兴琥, 等. 北江流域汛期降水结构变化特征[J]. 热带地理, 2020, 40(1): 145-153. [Liu Zhanming, Xu Dan, Wei Xinghu, et al. Variation characteristics of precipitation structure during rainy season in Beijiang River Basin[J]. Tropical Geography, 2020, 40(1): 145-153.]

[10] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1-2): 123-138.

[11] Karl T R, Knight R W, Plummer N. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century[J]. Nature, 1995, 377 (6546): 217-220.

[12] Brunetti M, Maugeri M, Monti F, et al. Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D5): D05102.

[13] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R. Changes in intense precipitation over the central United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(1): 47-66.

[14] 王延吉, 神祥金, 姜明. 1961—2018年长白山区不同等级降水时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(2): 227-238. [Wang Yanji, Shen Xiangjin, Jiang Ming. Spatial-temporal variation characteristics of different grades of precipitation in Changbai Mountain from 1961 to 2018[J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26(2): 227-238.]

[15] 刘伟东, 尤焕苓. 1978—2010年北京地区不同等级降水空间特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1053-1060. [Liu Weidong, You Huanling. Precipitation spatial distribution characteristics in Beijing during 1978-2010[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1053-1060.]

[16] 白静漪, 管兆勇. 华东地区夏季不同等级降水变化特征分析[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 365-372. [Bai Jingyi, Guan Zhaoyong. Climatic characteristics of graded summer precipitation over East China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(4): 365-372.]

[17] 曹彦超, 焦美玲, 秦拓, 等. 1973—2020年甘肃河东夏半年降水变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1695-1706. [Cao Yanchao, Jiao Meiling, Qin Tuo, et al. Variation characteristics and influencing factors of summer half-year precipitation in Hedong region of Gansu Province from 1973 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1695-1706.]

[18] 黄婕, 王跃峰, 高路, 等. 1960—2011年福建省不同等级降水时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 17-23. [Huang Jie, Wang Yuefeng, Gao Lu, et al. Temporal-spatial characteristics of different rainfall levels in Fujian Province from 1960 to 2011[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 17-23.]

[19] Qu B, Lv A, Jia S, et al. Daily precipitation changes over large river basins in China, 1960-2013[J]. Water, 2016, 8(5): 185.

[20] 王璐璐, 延军平, 王鹏涛, 等. 海河流域不同等级降水时空变化特征及其影响[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 690-699. [Wang Lulu, Yan Junping, Wang Pengtao, et al. Spatial-temporal variation in precipitation for different categories and impacts in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2015, 37(4): 690-699.]

[21] 李远平, 朱诚, 马春梅, 等. 淠河流域不同强度等级降水变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1477-1482. [Li Yuanping, Zhu Cheng, Ma Chunmei, et al. Study on changes of different-class precipitation in intensity in Pi River valley[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(9): 1477-1482.]

[22] 张强, 叶培龙, 王健顺, 等. 对黄河上游自然环境要素协调性的几点科学探讨与思考[J]. 地球科学进展, 2023, 38(3): 320-329. [Zhang Qiang, Ye Peilong, Wang Jianshun, et al. Scientific discussion and ponder on the coordination of natural environmental in the upper Yellow River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(3): 320-329.]

[23] Wang Y, Wang J, Zhang Q. Analysis of ecological drought risk characteristics and leading factors in the Yellow River Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2024, 155(3): 1739-1757.

[24] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近40年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048-1058. [Huang Jianping, Zhang Guolong, Yu Haipeng, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1048-1058.]

[25] 何金梅, 李照荣, 闫昕旸, 等. 黄河兰州上游流域近4a汛期降水变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 899-905. [He Jinmei, Li Zhaorong, Yan Xinyang, et al. Variation characteristics of precipitation in the upper lanzhou section of the Yellow River in flood season during 2015-2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 899-905.]

[26] Gao T, Wang H. Trends in precipitation extremes over the Yellow River basin in North China: Changing properties and causes[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(13): 2412-2428.

[27] Wang W, Shao Q, Yang T, et al. Changes in daily temperature and precipitation extremes in the Yellow River Basin, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27 (2): 401-421.

[28] 高秉丽, 巩杰, 李焱, 等. 基于SPEI的黄河流域多尺度干湿特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 723-733. [Gao Bingli, Gong Jie, Li Yan, et al. Analysis of multi-scalar characteristics of dry

and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 723–733.]

[29] Yang J H, Zhang Q, Yue P, et al. Characteristics of warming and humidification in the Yellow River's upper reaches and their impact on surface water resources[J]. International Journal of Climatology, 2023, 43(16): 7667–7681.

[30] 黄小梅, 齐冬梅, 李笛, 等. 西亚副热带西风急流年际变化与三江源区夏季降水的关系[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 1–8. [Huang Xiaomei, Qi Dongmei, Li Di, et al. Annual relationship between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation over the Three River Source Region[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 1–8.]

[31] 杨金虎, 张强, 杨博成, 等. 黄河上游暖湿化的多时间尺度特征及对生态植被的影响[J]. 高原气象, 2023, 42(4): 1018–1030. [Yang Jinhu, Zhang Qiang, Yang Bocheng, et al. The multi-time scale characteristics and impacts on ecological vegetation of warming and humidification in the upper Yellow River[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 1018–1030.]

[32] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967–979. [Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967–979.]

[33] 中华人民共和国国家质量检测检验委总局, 中国国家标准化管理委员会. 降水量等级(GB/T 28592–2012)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1–6. [General Administration of Quality Super Vision, Inspection and Quarantine of the People and Republic of China. GB/T28592–2012 Grade of Precipitation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 1–6.]

[34] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气侯与环境研究, 2000, 5(3): 267–272. [Yan Zhongwei, Yang Chi. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(3): 267–272.]

[35] 汪卫平, 杨修群, 张祖强, 等. 中国雨日数的气候特征及趋势变化[J]. 气象科学, 2017, 37(3): 317–328. [Wang Weiping, Yang Xiuqun, Zhang Zuqiang. et al. The climatic characteristics and trends of rainy days over China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(3): 317–328.]

[36] Qian W H, Fu J L, Yan Z W. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961–2005 [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(11): L11705.

[37] 董旭光, 顾伟宗, 孟祥新, 等. 山东省近50年来降水事件变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 661–671. [Dong Xuguang, Gu Weizong, Meng Xiangxin, et al. Change features of precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 661–671.]

[38] Qian Y, Gong D Y, Leung R. Light rain events change over North America, Europe, and Asia for 1973–2009[J]. Atmospheric Science Letters, 2010, 11(4): 301–306.

[39] Cheng Y J, Lohmann U, Zhang J H, et al. Contribution of changes in seasurface temperature and aerosol loading to the decreasing precipitation trend in southern China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(9): 1381–1390.

[40] Wu F T, Fu C B. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1385–1394.

[41] 陈思宇, 黄建平, 付强, 等. 气溶胶对我国中东部地区秋季降水的影响[J]. 热带气象学报, 2012, 28(3): 339–347. [Chen Siyu Huang Jianping, Fu Qiang, et al. Effects of aerosols on autumn precipitation over mid-eastern china[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(3): 339–347.]

[42] 陈晓燕, 尚可政, 王式功, 等. 近50年中国不同强度降水日数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 766–772. [Chen Xiaoyan, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. Analysis on the spatiotemporal characteristics of precipitation under different intensities in China in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 766–772.]

[43] Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960–2000[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D8): D08103.

Spatiotemporal characteristics of different grades of precipitation in Yellow River Basin from 1960 to 2020

YUAN Zheng[1], ZHANG Zhigao[2], YAN Jin[2], LIU Jiayi[2],
HU Zhuyu[2], WANG Yun[3], CAI Maotang[4]

(1. School of Mathematical and Information Science, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, Henan, China;
2. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China;
3. Dingxi Meteorological Office of Gansu, Dingxi 743000, Gansu, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Yellow River Basin is an important ecologically fragile area in China. The clarification of the relationship between different levels of precipitation, precipitation days, and precipitation intensity in the basin is important to characterize the precipitation patterns in the basin. Using precipitation data collected from 96 meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020, the spatial and temporal variation characteristics of different grades of precipitation in the basin were analyzed using mathematical statistics and Pearson correlation analysis, and the contribution and impact of different grades of precipitation on the total precipitation were discussed. In the studied recent 61-year period, the annual precipitation and precipitation intensity in the Yellow River Basin followed increasing trends with rates of 0.008 mm·$(10a)^{-1}$ and 0.12 mm·d^{-1}·$(10a)^{-1}$, respectively. The number of precipitation days followed a decreasing trend with a rate of −1.82 d·$(10a)^{-1}$. The rainfall and days of light rain and moderate rain followed a downward trend; the amount and number of days of heavy rain, rainstorm, and heavy rainstorm followed an upward trend, and the precipitation intensity of each grade followed an increasing trend. Over the recent 61-year studied period, the highest occurrence rate of light rain was 84.32%, with the highest contribution rate from light rain (37.64%) followed by moderate rain (34.47%). The occurrence rate and contribution rate of light rain followed decreasing trends, whereas the occurrence rate and contribution rate of precipitation of heavy rain followed increasing trends. The areas with high values of light precipitation, light precipitation days, and light precipitation intensity were mainly concentrated in the southwest of the basin. As the precipitation level increased, the areas with high precipitation, precipitation days, and precipitation intensity were mainly concentrated in the southeast of the basin. Correlation analysis revealed that the annual precipitation of the Yellow River Basin was strongly affected by moderate and heavy rainfall, the annual precipitation days were strongly affected by the light rain days, and the annual precipitation intensity was strongly affected by the amount of heavy rain, rainstorm, and precipitation days. These findings can support ecological protection in the basin.

Keywords: precipitation grade; spatio-temporal variation; precipitation intensity; climate inclination rate; Yellow River Basin